

ТРЕХВОЛНОВЫЙ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕР С АКУСТООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

В. А. Горобец\*, Е. В. Лебедок, Р. Ю. Микулич, С. С. Шавель

УДК 621.373.8

ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,  
220072, Минск, Беларусь; e-mail: v.gorobets@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 25 мая 2020)

Описаны принцип работы и особенности процесса генерации трехволнового CO<sub>2</sub>-лазера с акустооптической модуляцией добротности. Оптимизация состава активной среды и условий ее возбуждения, а также выбор генерирующих линий позволяют получать генерацию с выходной мощностью до 5 Вт на линии в устойчивом многоволновом режиме. Продемонстрирован эффективный метод модуляции добротности трехволнового CO<sub>2</sub>-лазера, позволяющий управлять выходным излучением как в широком спектральном диапазоне, так и в широкой области частот модуляции. С целью упрощения сбора и обработки данных экспериментально реализован метод разделения сигналов по длинам волн разнесением сигналов во времени с помощью внешнего селективного модулятора.

**Ключевые слова:** CO<sub>2</sub>-лазер, многоволновая генерация, акустооптический модулятор.

The principle of operation and features of the oscillating process for a three-wave CO<sub>2</sub> laser with acousto-optic Q-switching are described. Optimization of the composition of the active medium and the conditions of its excitation, as well as the choice of oscillating lines, allow obtaining oscillation with an output power of up to 5 W per line in a stable multi-wave mode. An efficient Q-switching method for a three-wave CO<sub>2</sub> laser is demonstrated, which makes it possible to control the output radiation both in a wide spectral range and in a wide range of modulation frequencies. In order to simplify data acquisition and processing, a method for separating signals with different wavelengths by spacing signals in time has been experimentally implemented using an external selective modulator.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser, multi-wave oscillation, acousto-optic modulator.

**Введение.** Развитие лазерных технологий расширяет спектральный диапазон когерентного излучения, в том числе в ИК-области спектра. Одним из перспективных направлений создания лазерных источников ИК-диапазона является разработка лазеров на базе давно зарекомендовавших себя перестраиваемых CO<sub>2</sub>-лазеров [1—5]. Их излучение подходит для целей молекулярной спектроскопии, создания управляемых по длине волны ИК-источников лазерной подсветки, медицины, газоанализа и преобразования в нелинейных кристаллах, так как характеризуется высокой мощностью, узкими спектральными линиями и малой расходимостью, близкой к дифракционной. Однако перестраиваемые CO<sub>2</sub>-лазерные источники, пригодные для практических целей, отличаются достаточно большой стоимостью и сложностью изготовления. При этом при решении поставленных задач, как правило, нельзя ограничиться одним источником. Это влечет за собой усложнение и удорожание экспериментальной техники за счет не только привлечения нескольких лазерных источников, но и необходимости синхронизации их излучения и сведения лучей в пространстве. Применение многоволновых систем существенно уменьшает затраты на создание сложных лазерных устройств. Вместе с тем разработка многоволновых систем и получение в них устойчивой многоволновой генерации требуют проведения исследований, направленных на целенаправленный подбор линий генерации и условий возбуждения активной среды.

---

**THREE-WAVE CO<sub>2</sub> LASER WITH ACOUSTO-OPTIC Q-SWITCHING**

V. A. Gorobets\*, Y. V. Lebiadok, R. Y. Mikulich, S. S. Shavel (SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: v.gorobets@ifanbel.bas-net.by)

Практическое использование  $\text{CO}_2$ -лазерных систем, в том числе многоволновых, требует также эффективной модуляции излучения. Один из перспективных путей решения этой проблемы — использование многоволнового  $\text{CO}_2$ -лазера с акустооптической (АО) модуляцией добротности. Применение для внутррезонаторной модуляции излучения АО-модуляторов на основе ИК-кристаллов вместо механических прерывателей (чопперов) и модуляция тока разряда позволяют эффективно управлять временными и энергетическими параметрами выходного излучения в широком диапазоне частот модуляции с сохранением КПД лазера.

В настоящей работе описаны принцип работы и особенности процесса генерации трехволнового  $\text{CO}_2$ -лазера с АО-модуляцией добротности, который может быть использован для целей молекулярной спектроскопии, газоанализа и преобразования в нелинейных кристаллах.

**Схема трехволновой генерации.** Оптическая схема трехволнового  $\text{CO}_2$ -лазера и экспериментальной установки по исследованию его параметров приведены на рис. 1. Эксперименты проводились с серийной отпаянной газоразрядной трубкой ГЛ-501 с водяным охлаждением. Трубка ГЛ-501 характеризуется рекордными для отпаянных систем ресурсом работы (тысячи часов непрерывной работы) и удельным энергопотреблением с единицы длины ( $>50$  Вт/м), что повышает надежность и энергоэффективность  $\text{CO}_2$ -лазеров низкого давления с продольным разрядом на основе ГЛ-501. В трубку напускалась смесь газов  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}$  в соотношении 1:1.4:4:0.3 при общем давлении  $\sim 16$  Торр. Согласно [6], применение указанной рабочей смеси газов, отличающейся относительно меньшим по сравнению с обычно используемым для  $\text{CO}_2$ -лазеров низкого давления с продольным разрядом содержанием гелия и наличием добавок ксенона, приводит к существенному (до 1.5 раза) увеличению выходной мощности генерации за счет улучшения разрядных характеристик активной среды (увеличение концентрации электронов вследствие более низкого потенциала ионизации Хе и смещение отношения напряженности электрического поля к числу частиц  $E/N$  в более оптимальную сторону), уменьшения диссоциации рабочей молекулы  $\text{CO}_2$  и возрастания эффективности возбуждения колебания  $\nu_3 \text{CO}_2$  и колебаний  $\text{N}_2$ .

Конструктив трехволнового  $\text{CO}_2$ -лазера, основанный на применении газоразрядной трубки ГЛ-501, выбирался исходя из возможности в случае необходимости перейти на генерацию на молекуле  $\text{CO}$  в диапазоне 5.2—6.4 мкм простой заменой газоразрядной трубки ГЛ-501 на идентичную по габаритам ГЛ-509. Подобная замена применялась в перестраиваемом  $\text{CO}_2(\text{CO})$ -лазере [7] и позволяла легко осуществлять переход с 10-мкм диапазона на 5-мкм.

Питание разрядной трубки осуществлялось от стабилизированного высоковольтного источника. Резонатор образован встроенным в трубку глухим зеркалом 2, дифракционной решеткой 3, работающей по неавтоколлимационной схеме [8] в первом порядке, и расположенными под небольшими углами к оси резонатора зеркалами 4 ( $\lambda_1$ ), 5 ( $\lambda_2$ ) и 6 ( $\lambda_3$ ). Для каждой длины волны генерации использо-

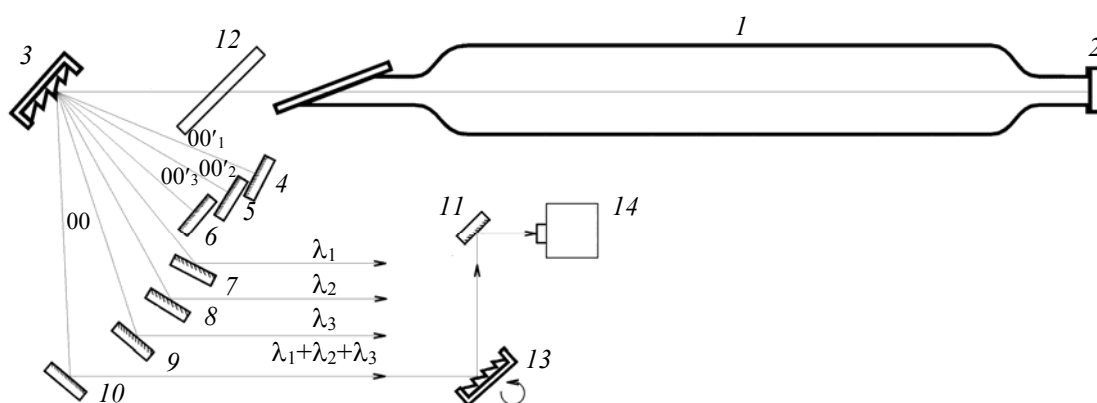


Рис. 1. Оптическая схема трехволнового  $\text{CO}_2$ -лазера и экспериментальной установки по исследованию его параметров: 1 — газоразрядная трубка; 2 — встроенное “глухое” зеркало; 3 — дифракционная решетка; 4, 5, 6 — дополнительные зеркала резонатора; 7, 8, 9, 10, 11 — поворотные зеркала; 12 — акустооптический модулятор; 13 — дифракционная решетка во вращающемся держателе; 14 — фотоприемник

вано дополнительное зеркало. Настройка резонатора на заданные линии генерации осуществлялась поворотом дифракционной решетки и подюстировкой дополнительных зеркал 4, 5 и 6. Зеркало 2 имело радиус кривизны 3 м, дополнительные зеркала 4, 5, 6 — 10 м. Дифракционная решетка и дополнительные зеркала размещались в держателях, которые обеспечивали юстировку в двух плоскостях. Использовалась решетка 150 штр/мм с коэффициентом отражения в первый порядок 94 %. Вывод излучения из резонатора примерно в равном соотношении осуществлялся через 00- и 00'-порядки.

Известно [8], что при выводе через 00-порядок излучение с  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  распространяется по одному и тому же оптическому пути. Использование для практических целей всегда присутствующих в неавтоколлимационной схеме резонатора, но редко используемых дополнительных пучков излучения с разными длинами волн, выводимыми через 00'-порядки, обеспечивает получение дополнительно к основному пучку пространственно разнесенных пучков излучения с разными длинами волн. Это может быть удобно при использовании режима многоволновой генерации в оптических схемах преобразования, требующих смещения лучей под определенными углами фазового синхронизма.

Примененная нами конструкция резонатора по неавтоколлимационной схеме позволяет независимо настраивать каждый из каналов на заданную линию как в режиме одновременной генерации сразу на нескольких линиях, так и в поочередной генерации на каждой из линий. Предложенная схема резонатора позволяет, расширив число дополнительных зеркал, получать более трех генерируемых линий. Количество возможных линий генерации ограничивается геометрическими размерами разлагаемых дифракционной решеткой по спектру световых пучков на дополнительных зеркалах, углами дифракции для соответствующих длин волн в неавтоколлимационном режиме и габаритами используемых оптических элементов и держателей. Для удобства обслуживания и юстировки число одновременно генерируемых линий ограничено тремя.

В предложенной полуконфокальной схеме резонатора фокус находится вблизи дополнительных зеркал 4, 5, 6. В этом случае диаметр светового пятна на дополнительных зеркалах не превышает 5 мм в одномодовом режиме генерации. Распространение выводимого через нулевой порядок решетки многоволнового излучения строго по одному и тому же пути является характерной особенностью данной схемы резонатора. Следует отметить, что для такого важного практического приложения, как дистанционный газоанализ, это принципиально важное преимущество (для обеспечения условия “замороженной атмосферы” в лазерных трассовых газоанализаторах).

Для исследования режимов генерации излучение, выводимое через 00- и 00'-порядки, с помощью поворотных зеркал 7, 8, 9 и 10 подавалось на измерители мощности ИМО-2Н и (или) КРТ-фотоприемники. Электрический сигнал с приемников регистрировался цифровым двухканальным осциллографом. Анализ спектра генерации проводился с помощью монохроматора SPM-2. На монохроматор подавалось промодулированное излучение, выводимое из резонатора через 00-порядок.

Суммарная мощность трехволнового излучения, выводимого через нулевой порядок, как правило, несколько превосходила выходную мощность лазера в обычном одномодовом режиме и зависела от комбинаций выбранных колебательно-вращательных линий. Это обусловлено взаимным влиянием излучения на разных переходах молекулы CO<sub>2</sub> (например, вследствие связи через общие колебательные состояния или за счет перераспределения энергии при каскадных переходах).

Исследование взаимного влияния каналов генерации для обоих типов измерителей (ИМО-2Н и КРТ) показало, что настройка зеркал резонатора на различные колебательные полосы, независимо от выбора вращательной линии, не вызывает конкуренции переходов, а приводит к устойчивому многоволновому режиму с высокой стабильностью выходной мощности (~3 %). Для переходов, не связанных общим колебательным состоянием, выходная мощность практически не зависит от того, есть генерация в соседнем канале или нет. Наиболее сильное взаимное влияние каналов, обусловленное конкуренцией переходов, наблюдалось при генерации на различных вращательных линиях для одной и той же колебательной полосы. Конкуренция приводила к тому, что при переходе к режиму одновременной генерации выходная мощность в каждом из каналов уменьшалась (в ~2 раза), а не увеличивалась, как в случае каскадной генерации. Стабильность генерации при этом значительно ухудшалась. Особенно это заметно при измерениях выходных сигналов КРТ-фотоприемниками в микросекундном интервале времени. Даже небольшая разъюстировка одного из зеркал резонатора или установка неоптимального тока разряда приводила к сильным пульсациям, возникающим в противофазе в каждом из каналов генерации. Эти пульсации можно было регистрировать и в секундном интервале времени с более инерционными измерителями ИМО-2Н.

Конкуренция переходов при генерации на различных вращательных линиях для одной и той же колебательной полосы является примером неустойчивого равновесия в распределении энергий по многочисленным уровням и подуровням молекулы  $\text{CO}_2$ . Для лазерной системы гораздо более устойчива генерация, при которой не происходит обмена энергией между участвующими в генерации уровнями вследствие быстрой вращательной релаксации энергии. В этом случае определяющей становится более медленная колебательно-вращательная релаксация, вносящая основной вклад в процесс заселения участвующих в процессе генерации уровней, принадлежащих разным колебательным полосам. В случае генерации на линиях какой-либо одной полосы даже при высокой плотности излучения в резонаторе для  $\text{CO}_2$ -многоволнового лазера наблюдается сильная конкуренция переходов, что затрудняет его практическое использование.

Для двухволновой генерации в ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазере показано [9], что особенности режима одновременной генерации для различных комбинаций колебательно-вращательных линий можно объяснить на основе полевого механизма, обусловленного нарушением равновесного распределения частиц по вращательным подуровням под действием высоких интенсивностей излучения. При этом для реализации устойчивого режима одновременной двухволновой генерации важно реализовать достаточно высокую плотность излучения в активной среде ( $\sim 100 \text{ Вт/см}^2$ ) [9]. Такая особенность двухволнового режима работы  $\text{CO}_2$ -лазера в полной мере проявляется и при одновременной многоволновой генерации (более чем на двух линиях).

**АО-модуляция.** Для увеличения пиковой мощности лазера и расширения области его практического использования применен такой эффективный и надежный метод управления временными, энергетическими и спектральными характеристиками выходного излучения, как внутррезонаторная АО-модуляция [10, 11]. В работе [10] показана возможность эффективной модуляции добротности непрерывного  $\text{CO}$ -лазера с помощью рефракционного АО-модулятора на кристалле КРС-5. Кристаллы КРС-5 обладают высокой АО-эффективностью и низким коэффициентом поглощения в широком диапазоне, что делает их весьма перспективным материалом звукопровода для внутррезонаторных АО-модуляторов. В то же время использование для модуляции добротности режима рефракции лазерного пучка на стоячей ультразвуковой волне позволяет значительно повысить эффективность модуляции, а также совместить звукопровод модулятора с окном Брюстера газоразрядной трубки или непосредственно с выходным зеркалом лазерного резонатора [10]. Это дает возможность исключить вносимые оптические потери, имеющие место при работе с электрооптическими или дифракционными АО-модуляторами. Перспективность применения эффективной модуляции добротности непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера с помощью рефракционного АО-модулятора подтверждена в [11], где реализован процесс пространственного переключения каналов генерации в двухволновом  $\text{CO}_2$ -лазере.

Для эффективной модуляции добротности  $\text{CO}_2$ -лазера низкого давления с продольным разрядом использован АО-модулятор, аналогичный [10]. АО-модулятор 12 (рис. 1) помещался в резонатор трехволнового лазера между дифракционной решеткой и газоразрядной трубкой вблизи области перетяжки лазерного пучка. Модулятор, который размещался под углом Брюстера к оптической оси резонатора, выполнен из полированного кристалла КРС-5 размерами  $70 \times 70 \times 10$  мм, к одной из граней которого крепился пьезопреобразователь (ЦТС-19) таким образом, чтобы направление распространения ультразвуковой волны было перпендикулярно направлению лазерного пучка.

Лазер мог генерировать излучение на  $\sim 100$  колебательно-вращательных переходах в диапазоне  $\Delta\lambda = 9.2\text{—}11.1$  мкм. Выходная мощность в непрерывном одномодовом режиме с размещенным внутррезонаторным модулятором без управляющего сигнала составляла на сильных линиях  $P_{\text{св}} \sim 1$  Вт. Нестабильность выходной мощности  $\leq 2\%$ . При подаче на АО-модулятор управляющего синусоидального сигнала с амплитудой  $U = 10\text{—}50$  В на всех генерируемых длинах волн наблюдалась модуляция выходного излучения в диапазоне частот  $1\text{—}220$  кГц (ограничиваемом используемым источником питания). На рис. 2 приведена огибающая АЧХ, выраженная в относительных интенсивностях оптического сигнала на фотоприемнике  $I/I_0$  (отношениях интенсивностей модулированных на частоте  $f_m$  сигналов по сравнению с немодулированным), полученная при АО-модуляции добротности  $\text{CO}_2$ -лазера, работающего на линии  $10P(20)$  ( $\lambda = 10.6$  мкм). АЧХ представляет собой ряд эквидистантно расположенных резонансов, соответствующих резонансам АО-кристалла, и множество слабо выраженных резонансов, появление которых можно объяснить несовершенством изготовления модулятора.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы импульсов генерации при АО-модуляции добротности на различных частотах модуляции  $f$ . Импульсная мощность выходного излучения в области резонанса АЧХ при 100%-й модуляции превышала стационарную в 5 раз. Это соответствует пиковой мощности на сильных линиях 0.1 кВт при длительности отдельного импульса на полувысоте  $\tau \geq 0.5$  мкс и длительности переднего фронта  $t \geq 200$  нс. При дальнейшем повышении  $U$  проявлялся режим удвоения периода (рис. 3, в, г) с последующим переходом к хаотическим колебаниям.

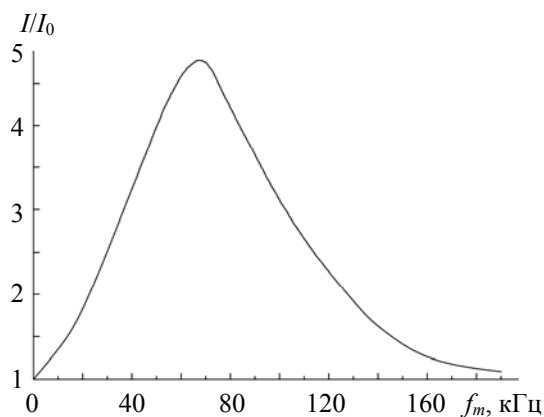


Рис. 2. Огибающая АЧХ CO<sub>2</sub>-лазера с АО-модуляцией добротности

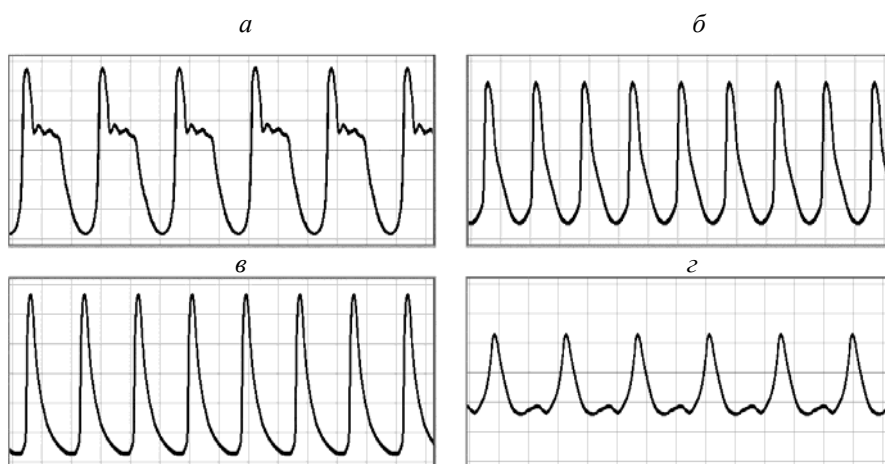


Рис. 3. Осциллограммы импульсов генерации CO<sub>2</sub>-лазера при 100 %-й АО-модуляции добротности:  $f = 18$  (а), 85 (б) и 220 кГц (в); г — удвоение периода

Режим удвоения периода более устойчив к периодическим возмущениям вследствие того, что наибольшее влияние на систему оказывают возмущения с вдвое меньшей относительно модулирующей систему частотой колебаний — каскад Фейгенбаума [12]. Дальнейший переход к хаотическому поведению является наглядной реализацией так называемого перехода к аperiodическому (хаотическому) состоянию по универсальному сценарию Фейгенбаума для поведения сложной системы [12]. Сценарий предопределяет порядок и скорость перехода к беспорядку как связанных осцилляторов, так и вообще всех систем, испытывающих удвоение периода, и определяет тот факт, что система переходит к хаосу через последовательность удвоения периода.

**Разделение по длинам волн вышедшего через 00-порядок излучения.** Для целей преобразования может использоваться не только излучение на нескольких длинах волн, вышедшее через 00'-порядки и распространяющееся по разным оптическим путям, но и одновременное излучение на нескольких длинах волн, вышедшее через 00-порядок. В этом случае сигналы не разделены пространственно и возникает проблема разделения сигналов по длинам волн. С точки зрения упрощения

сбора и обработки данных наиболее удобно разносить сигналы во времени с помощью внешнего селективного модулятора. Хотя мощность лазерного излучения при выключенном АО-модуляторе существенно ниже, чем в случае АО-модуляции, такое многоволновое излучение, распространяющееся по одному оптическому пути, часто удобно для некоторых практических приложений, например дистанционного газоанализа. В этом случае отсутствует необходимость в дополнительных фотоприемниках, ухудшающих точность измерения. Если установить в качестве поворотного зеркала вращающуюся вокруг оси, параллельной своим штрихам, дифракционную решетку, то излучение, попадающее на фотоприемник, будет не только промодулировано, но и разделено по времени в зависимости от длины волны. Наиболее оптимальные для обработки сигналов результаты получены с дифракционной решеткой 150 штр/мм, работающей во втором порядке (угол блеска  $\sim 45^\circ$ ).

На рис. 4 приведена типичная осциллограмма выходного излучения, регистрируемая фотоприемником при разделении сигналов во времени для  $\lambda_1 = 9.28$  мкм (9R(18)),  $\lambda_2 = 10.25$  мкм (10R(20)) и  $\lambda_3 = 10.59$  мкм (10P(20)).

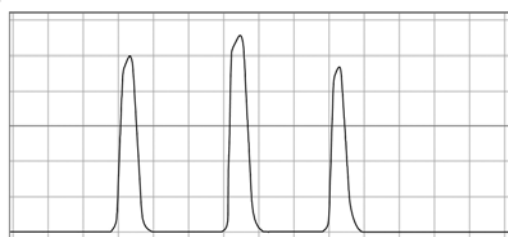


Рис. 4. Серия разделенных по времени импульсов лазерного излучения:  $\lambda_1 = 9.28$  мкм (первый пик),  $\lambda_2 = 10.25$  мкм (второй),  $\lambda_3 = 10.59$  мкм (третий)

**Заключение.** Создан трехволновый  $\text{CO}_2$ -лазер с акустооптической модуляцией добротности, в конструкции которого применена неавтоколлимационная схема оптического резонатора. Использование неавтоколлимационной схемы позволило создать лазерную систему с многоволновым излучением, распространяющимся как по одному оптическому пути, так и по отдельным направлениям для каждой длины волны. Оптимизация состава активной среды и условий ее возбуждения, а также выбор генерирующих линий позволяют получать генерацию с выходной мощностью до 5 Вт на линии в устойчивом многоволновом режиме.

Продемонстрирован эффективный метод модуляции добротности трехволнового  $\text{CO}_2$ -лазера, позволяющий управлять выходным излучением как в широком спектральном диапазоне, так и в широкой области частот модуляции. Применение данного метода дает возможность эффективно управлять временными и энергетическими параметрами выходного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера на фиксированных частотах модуляции в широком диапазоне частот с сохранением КПД лазера.

С целью упрощения сбора и обработки данных экспериментально реализован метод разделения сигналов по длинам волн разнесением сигналов во времени с помощью внешнего селективного модулятора.

Трехволновый  $\text{CO}_2$ -лазер с акустооптической модуляцией добротности может быть использован для целей молекулярной спектроскопии, газоанализа и преобразования в нелинейных кристаллах, а также в качестве управляемого источника подсветки/засветки с селекцией по типу фотоприемника (например, QWIP-матрицы и матрицы на основе CdHgTe).

- [1] Yanning Yu, Chongyi Wan, Yan Lu, Rongqing Tan, Jinwen Zhou, Shiming Liu, Chong Zhao. Opt. Laser Technol., **37** (2005) 560—562
- [2] Manoj Kumar, T. Reghu, A.K. Biswas, Pankaj Bhargav, J. S. Pakhare, Shailesh Kumar, Abrat Verma, Vagesh Mandloi, L.M. Kukreja. Opt. Laser Technol., **64** (2014) 64—71
- [3] A. I. Karapuzikov, A. N. Malov, I. V. Sherstov. Infrared Phys. Technol., **41** (2000) 77—85
- [4] Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко, В. А. Горобец, О. Г. Ланская, В. О. Петухов, Н. П. Солдаткин, А. А. Тихомиров. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы, под ред. чл.-кор. РАН М. В. Кабанова, Томск, Институт оптики атмосферы СО РАН (2004) 399—520

- 
- [5] **V. Petukhov, V. Gorobets.** CO<sub>2</sub> Laser — Optimisation and Application, Ed. Dan C. Dumitras, Ch. 3, CO<sub>2</sub> Lasing on Non-Traditional Bands, InTech, Croatia (2012) 103—136
- [6] **V. A. Gorobets, V. O. Petukhov, V. V. Churakov.** J. Tech. Phys., **XL**, N 3 (1999) 185—189
- [7] **В. А. Горобец, В. О. Петухов, С. Я. Точицкий, В. В. Чураков.** Приборы и техника эксперимента, № 1 (1994) 159—169
- [8] **M. G. Liftman, H. J. Metcalf.** Appl. Opt., **17** (1978) 2224—2227
- [9] **Б. Ф. Кунцевич, В. О. Петухов, С. Я. Точицкий, В. В. Чураков.** Квант. электрон., **20** (1993) 559—563
- [10] **К. В. Козлов, Г. А. Пашкевич, В. Н. Чижевский, В. В. Чураков.** Квант. электрон., **16**, N 4 (1989) 744—746 [**K. V. Kozlov, G. A. Pashkevich, V. N. Chizhevskii, V. V. Churakov.** Sov. J. Quantum Electron., **19**, N 4 (1989) 486—487]
- [11] **Peng Ruan, Qikun Pan, Jijiang Xie, Chunling Liu, Yuan Chai.** Infrared Phys. Technol., **92** (2018) 299—303
- [12] **М. Фейгенбаум.** УФН, **141** (1983) 343—348